

안테나배열을 이용한 콘크리트부재 내부의 비파괴시험과 영상화방법 개발

Subsurface Imaging Technology For Damage Detection of Concrete Structures Using Microwave Antenna Array

김 유 진* / 최 고 일** / 장 일 영***

Kim, Yoo Jin / Choi, Ko Il / Jang, Il Young

Abstract

Microwave tomographic imaging technology using a bi-focusing operator has been developed in order to detect the internal voids/objects inside concrete structures. The imaging system consists of several cylindrical or planar array antennas for transmitting and receiving signals, and a numerical focusing operator is applied to the external signals both in transmitting and in receiving fields. In this study, the authors developed 3-dimensional (3D) electromagnetic (EM) imaging technology to detect such damage and to identify exact location of steel rebars or dowel. The authors have developed sub-surface two-dimensional (2D) imaging technique using tomographic antenna array in previous works. In this study, extending the earlier analytical and experimental works on 2D image reconstruction, a 3D microwave imaging system using tomographic antenna array was developed, and multi-frequency technique was applied to improve quality of the reconstructed image and to reduce background noises. Numerical simulation demonstrated that a sub-surface image can be successfully reconstructed by using the proposed tomographic imaging technology. For the experimental verification, a prototype antenna array was fabricated and tested on a concrete specimen.

key words : Antenna Array, Non-Destructive Evaluation (NDE), 3D Imaging Technology, Damage Detection

요 지

콘크리트 구조물 내부 결함이나 철근 위치를 탐지하기 위하여 초단파를 이용하는 비파괴 시험방법이 구조물 안전진단 분야에서도 최근 관심을 불러일으키고 있다. 본 연구의 목적은 기 개발된 2차원 영상화 방법을 확장하여 3차원 영상처리방법을 개발하는 것이다. 그 방법으로 콘크리트 구조물 내의 결함을 탐지하기 위한 안테나를 구성, 수치적 초점조정시스템을 이용하여 송신부와 수신부의 초점을 동시 조절하여 구조물 내부의 모든 부분을 검색하였다. 또한 다중주파수 방식을 이용, 데이터의 오류를 제거하고 해상도를 향상시켜 구조물 내부의 결함이나 내부모습을 탐지할 수 있는 3차원 영상장치를 개발하고자 하였다. 실험 결과, 데이터 오류를 줄이는 다중주파수방식에 의하여 재현된 영상의 정확성을 검증하고, 주파수 조절방법에 의하여 4x4 안테나배열을 설계함으로써 5.2 GHz에서 주파수대역의 우수한 투과성능을 입증하였다. 즉 본 연구에서 개발된 슬롯안테나는 파동의 방사기능과 주파수대역의 넓이 등에서 구조부재의 결함탐지에 이용될 수 있음을 검증하였다.

핵심용어 : 안테나배열, 비파괴시험법, 3차원영상장치, 결함탐지

* Univ. of California at Irvine (e-mail : ujinkim@hotmail.com)

** 정회원 · 금오공과대학교 토목공학과 · 박사과정

*** 정회원 · 금오공과대학교 토목공학과 · 교수

1. 서론

사회기반 시설물의 많은 부분이 콘크리트 구조물로서 균열, 내부 공동, 철근 부식, 또는 외부 영향 등에 의하여 시간이 흐르면서 내구성능이 저하 되고 있으며, 이를 정량화할 수 있는 비파괴 시험방법의 발전이 요구되고 있다. 최근 비파괴 시험방법의 괄목할 발전에도 불구하고 현재까지도 육안관측에 상당부분을 의존하고 있는 현실은 아직까지도 기존 비파괴 시험방법에 많은 제약이 있기 때문이다. 콘크리트 구조물은 열화 정도나 근본적 시공 부실로 인하여 여러 가지 결함이 내부에 발생하기 쉬운 구조이며 구조물 내부 결함이나 철근 위치를 탐지하는 등 목적에 따라 여러 가지 비파괴 시험방법이 부분적으로 사용되고 있는 상황이다. 이러한 가운데 초단파를 이용하는 비파괴 시험방법이 의학계에서 암세포발견 등에 시도 되고 있는 것에 착안하여 구조물 안전진단 분야에서도 최근 관심을 불러일으키고 있다.

본 저자는 이미 초단파를 이용한 2차원 영상처리방법이 콘크리트 구조물의 비파괴 시험검사에 적합하게 개발하였으며, FRP (Fiber Reinforced Polymer) 섬유를 이용한 보강단면에 대한 접착부의 검사에 적용하여 공극 및 FRP 섬유와 콘크리트 표면사이의 부착과피 부분을 밝혀낸 바 있다(Feng, M. Q. et al., 2002 ; Kim Y. J. et al., 2002).

본 연구의 목적은 기 개발된 2차원 영상화 방법을 확장하여 3차원 영상처리방법을 개발하는 것이다.

그 방법으로 콘크리트 구조물 내의 결함을 탐지하기 위한 안테나를 구성하였으며(Fig. 1은 3차원적인 구조물 내부 탐사방법을 도식적으로 보여주고 있다), 평면 안테나의 조합들이 초단파 신호의 발신 수신에 이용되고 있으며 구조물 내부에서 검사하고자 하는 위치에 초점이 맞도록 수치적 초점조절시스템을 이용하여 소프트웨어적으로 조정 가능토록 하였다. 이는 초점을 고정시키지 않고 송신부와 수신부의 초점을 동시에 조절하여 구조물 내부의 모든 부분을 검색할 수 있게 함이다. 또한 다중주파수 방식을 이용함으로써 데이터의 오류를 제거하고 해상도를 향상시켜 구조물 내부의 결함이나 내부모습을 탐지할 수 있는 3차원 영상장치를 개발하고자 한다. 그리고 수치적 초점조절 시스템과 다중주파수방식의 성능은 수치적 시뮬레이션과 실험을 통하여 검증하였다.

2. 기본원리와 시스템의 구성

Fig. 1에 보이는 것과 같이 측정시스템은 송신부에

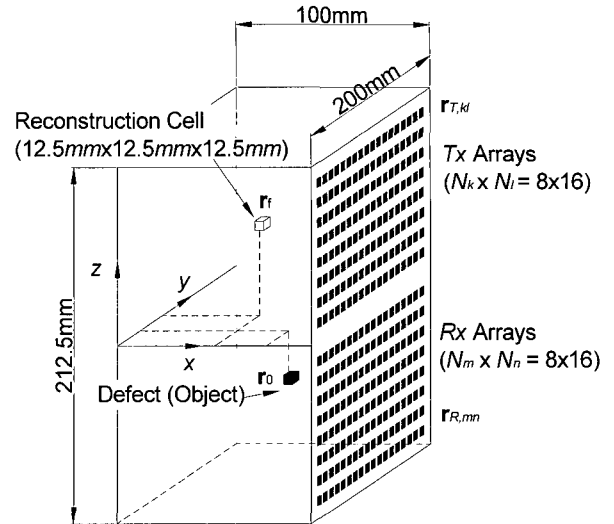


Fig. 1. Measurement geometry for planar transmitting and receiving arrays

N_k N_l 요소를, 수신부에 N_m N_n 요소를 사용한다. 측정 시에는 N_t N_r 행렬이 사용되며 N_t 는 송신요소의 숫자이고 N_r 은 수신요소의 숫자이다. 각각의 모든 송신요소에 대하여 N_r 수신요소열이 검색되어 N_t N_r 행렬이 작성되는 것이다.

전자기 보상의 원리에 의하여 결함에서의 신호는 동등한 강도의 분포전류 $J_{eq}(x_0, y_0, z_0)$ 를 일으키고, 이 분포전류가 형상화과정을 거치면서 전자기적인 형상이 멩히게 된다(Girone's I. M. et al., 1987). 형상재현 알고리즘은 송신 및 수신 안테나 한 개씩의 조합에 의해 형상을 재현하게 된다. 그러한 형상화 과정이 모든 배열안테나에서 이뤄지고 다시 전체가 조합되어 한 점에 초점을 맞추게 된다. 측정행렬을 수치적 방법으로 처리함으로써 이러한 과정이 이뤄질 수 있는 것이다. 초점조절시스템은 각 점의 데이터를 역산하는 과정이다. 각 점의 전기장은 Green의 정리에 의해 $e^{-jk_e r}/r$ 에 비례하므로 송신점 $r_{Tl}(x_{Tl}, y_{Tl}, z_{Tl})$ 에서 $r_f(x_f, y_f, z_f)$ 로 초점이 모아질 때 임의의 점 $r_i(x_i, y_i, z_i)$ 에서 입사되는 전기장은 식 (1)과 같이 나타내어진다.

$$E_i(x_i, y_i, z_i) = \sum_{l=1}^{N_t} \sum_{k=1}^{N_k} I_{Tkl}(x_f, y_f, z_f) \cdot \frac{e^{-jk_e |r_{Tkl} - r_i|}}{|r_{Tkl} - r_i|} \quad (1)$$

여기서, k_e 는 유효파수(effective wave number)이며, $I_{Tkl}(x_f, y_f, z_f)$ 은 초점조절 연산자로서 식(2)와 같이 나타내어진다.

$$I_{TKl}(x_f, y_f, z_f) = \frac{|\mathbf{r}_{TKl} - \mathbf{r}_f|}{e^{-jk_e|\mathbf{r}_{TKl} - \mathbf{r}_f|}} \quad (2)$$

결합이 $\mathbf{r}_0(x_0, y_0, z_0)$ 에 있다면 측정점 $\mathbf{r}_{Rmn}(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn})$ 에서의 산란된 신호는 식 (3)과 같다.

$$E_s(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn}) = E_i(x_0, y_0, z_0) \cdot I_{obj} \cdot \frac{e^{-jk_e|\mathbf{r}_{Rmn} - \mathbf{r}_0|}}{|\mathbf{r}_{Rmn} - \mathbf{r}_0|} \quad (3)$$

여기서, I_{obj} 는 재료의 전자기적 성질과 관련되는 상수이며 본 논문에서는 콘크리트와 공기의 유전율 (dielectric constant) 의 차이인 4.0 이 적용되었다.

수신된 영역인 $\mathbf{r}_{Rmn}(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn})$ 의 초점을 해당되는 측정점 $\mathbf{r}_f(x_f, y_f, z_f)$ 에 모으는 데에 있어서

$$E_f(x_f, y_f, z_f) = \sum_{n=1}^{N_n} \sum_{m=1}^{N_m} \left[I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f) \cdot \sum_{p=1}^{N_o} \left\{ I_{obj,p} \cdot \frac{e^{-jk_e|\mathbf{r}_{Rmn} - \mathbf{r}_{0,p}|}}{|\mathbf{r}_{Rmn} - \mathbf{r}_{0,p}|} \cdot \sum_{l=1}^{N_l} \sum_{k=1}^{N_k} I_{TKl}(x_f, y_f, z_f) \frac{e^{-jk_e|\mathbf{r}_{TKl} - \mathbf{r}_{0,p}|}}{|\mathbf{r}_{TKl} - \mathbf{r}_{0,p}|} \right\} \right] \quad (6)$$

식 (6)을 측정행렬이 포함된 행렬식으로 나타내기 위해서는 송신 및 수신배열의 첨자는 식 (7) 및 (8)과 같이 각각 조정되어야 한다. 여기서, 첨자 t 와 r은 1부터 128까지의 정수를 의미한다.

$$\mathbf{r}_{TKl} \rightarrow \mathbf{r}_{Tl} \quad (7)$$

$$E_f(x_f, y_f, z_f) = \begin{bmatrix} I_{T1} & I_{T2} & L & I_{Tn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} E_{s,T1R1} & E_{s,T1R2} & L & E_{s,T1Rr} \\ E_{s,T2R1} & E_{s,T2R2} & L & E_{s,T2Rr} \\ M & M & O & M \\ E_{s,TnR1} & E_{s,TnR2} & L & E_{s,TnRr} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{R1} \\ I_{R2} \\ M \\ I_{Rr} \end{bmatrix} \quad (9)$$

3. 안테나 배열의 설계

성능실험을 위하여 4x4 모양의 안테나 배열이 설계되었다. 전체 배열은 4x4 안테나 배열 16개의 조합으로 이루어져 있으므로 4x4 안테나 배열의 설계가 완성되면 전체배열은 확장에 의하여 얻어질 수 있다. 설계 주파수는 5.2 GHz로서 콘크리트 구조물의 검사를 위하여 구성되었다($r = 5.3$). 먼저, 단일 안테나요소가 홈 형태의 안테나로 구성되고, 형태와 투사능력을 감안한 단일 홈 형태의 안테나들이 Fig. 2와 같이 설계되었다.

$\mathbf{r}_f(x_f, y_f, z_f)$ 에서의 전자기적 영상 $E_f(x_f, y_f, z_f)$ 는 식 (4)와 같이 표현될 수 있다.

$$E_f(x_f, y_f, z_f) = \sum_{n=1}^{N_n} \sum_{m=1}^{N_m} E_s(x_{Rmn}, y_{Rmn}, z_{Rmn}) \cdot I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f) \quad (4)$$

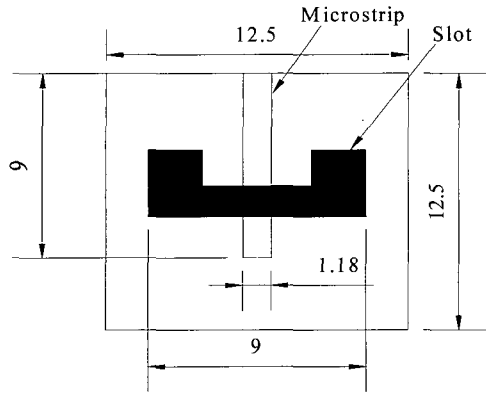
여기서, 초점조정 연산자인 $I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f)$ 은 식(5)로 주어진다.

$$I_{Rmn}(x_f, y_f, z_f) = \frac{|\mathbf{r}_{Rmn} - \mathbf{r}_f|}{e^{-jk_e|\mathbf{r}_{Rmn} - \mathbf{r}_f|}} \quad (5)$$

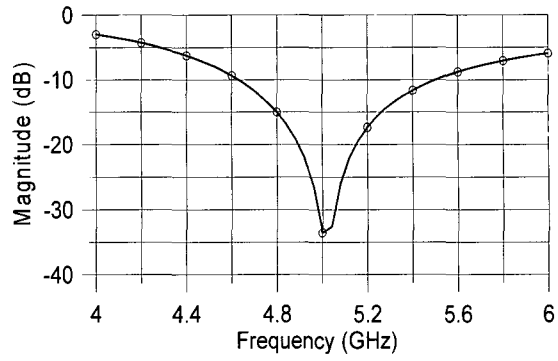
식 (1) 에서 식 (5) 까지의 과정은 다음의 식 (6)으로 나타내어질 수 있다.

$$\mathbf{r}_{Rmn} \rightarrow \mathbf{r}_{Rr} \quad (8)$$

행렬식은 다음의 식 (9)와 같이 나타내어지며 최종적인 측정행렬의 크기는 128 x 128 이 된다.



(a) Geometry of slot antenna



(b) S11 parameter (reflection measurement)

Fig. 2. Design of single slot-antenna element

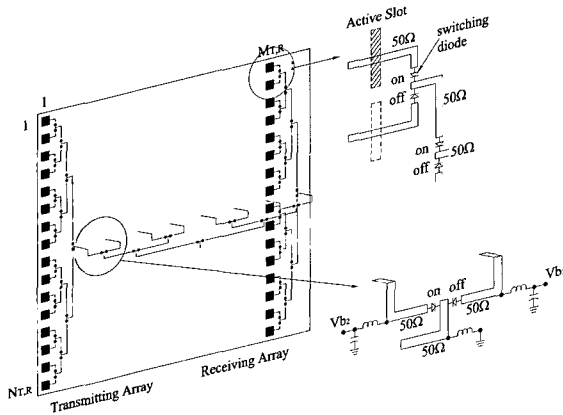


Fig. 3. Multiplexing technique using diodes

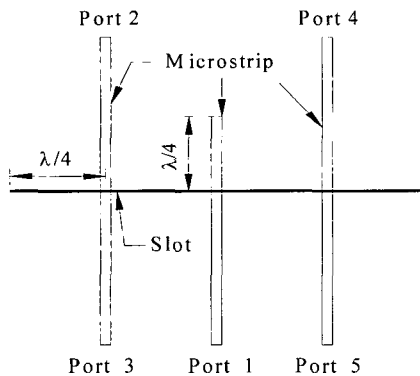
SPDT 정류기를 사용하지 않고 요소의 입구에 1개의 SPDT 정류기만 사용할 수 있게 되었다. SPDT 정류기로 인한 손실을 줄이고 전송부의 상태를 일치시킬 수 있게 된 것이다. 전체로 보면 128개의 SPDT 정류기와 정류기를 통제하기 위한 256개의 단자가 사용되었다.

두 번째 다중주파수방식에서 고려할 사항은 신호를 손실 없이 전달하고 주파수대역을 유지하기 위한 데이

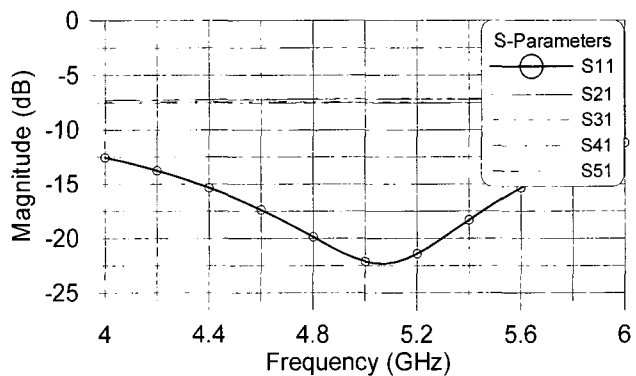
터 전송네트워크이다. T형의 연결부는 컨덴서 역할을 하기 때문에 T형 연결부에서 주파수대역이 달라진다. 이 문제를 해결하기 위해 Fig. 4에 보이는 예와 같이 주파수대역을 넓힐 수 있도록 얇은 띠형상과 홈형상을 가진 전송네트워크를 사용하였다(Knorr, J. B., 1974 ; Aikawa M+. et al., 1989).

신호가 포트 1로부터 포트 2에서 5가지로 각각 전달 되어갈 때 띠형상에서 홈형상으로 변환되어 가다가 최종적으로는 다시 홈형상에서 띠형상으로 변환되는 것이다. 회로의 성질을 설명하기 위하여 변환상수 S_{ij} 와 반사상수 S_{11} 이 사용된다. 띠형상에서 홈형상으로의 변환은 Fig. 4(b)와 같이 가장 적절한 주파수를 선택하여 설계되며 이 경우는 5 GHz 이다.

안테나요소하나의 송수신조건을 만족하기 위하여 ADS (Automated Design System)을 이용한 최적화방법이 사용되어 띠형상과 홈형상의 길이와 넓이를 최적화하였다. Fig. 5는 형상변환방법을 이용하여 두 개의 단자를 갖는 4x4 안테나요소를 최적화한 결과를 보인 것이다. 결과적으로 S_{11} 은 5.2 GHz에서 -20dB 이하이며 4.5 GHz에서 6 GHz 까지의 주파수대역을 갖는다.

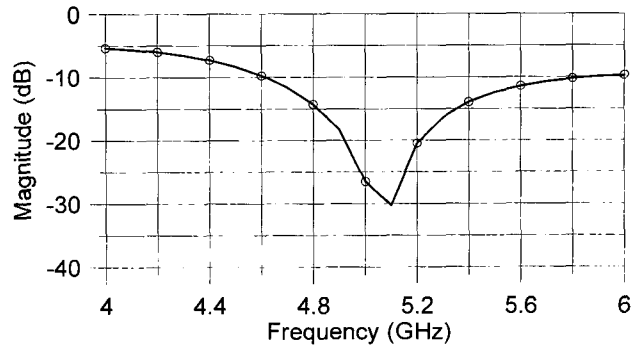
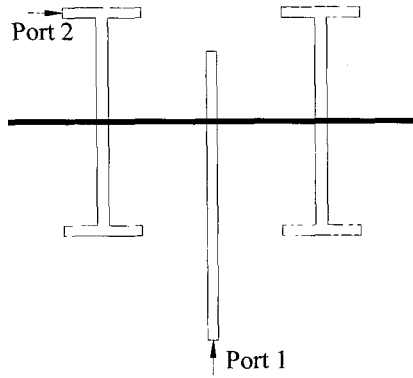


(a) Geometry of example



(b) S-parameters (reflection and transmission parameters)

Fig. 4. Microstrip-slot transition example



(a) Geometry of feeding network for 44 antenna array

(b) S11 parameter

Fig. 5. Optimized microstrip-slot transition

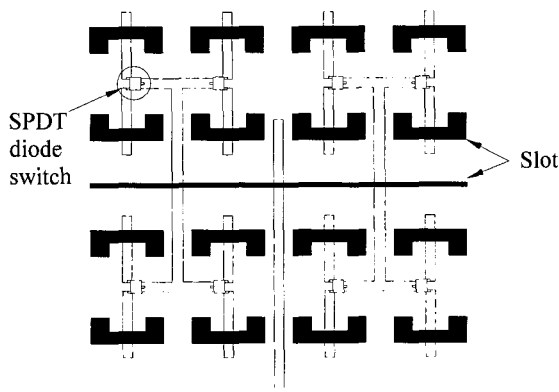


Fig. 6. Design of 44 antenna array

개폐작용과 띠-홈 변환작용을 전송방법으로 이용하
는 변환된 주파수조절방법에 의하여 4x4 안테나배열이
Fig. 6과 같이 완성되었다.

4. 실험적 연구

4.1 실험과정

본 실험에서는 중간에 공극이 있는 콘크리트판과
직사각형의 콘크리트 블록(block)이 이용되었다. 콘
크리트판은 최초의 캘리브레이션 과정에서 이용되었

다. 그 다음 콘크리트판의 한쪽 면에 원형 공극의 형
태로 결합을 제작하였다. 한 변의 길이가 30 cm인
콘크리트 시험체 내에는 두 가지 공극이 제작되었는
데 그 중 한 가지는 스티로폼(Styrofoam)로 만든
한 변의 길이가 2 cm 인 정사각형이고 다른 한 가지는
각 변이 5 cm 2 cm 2 cm 로서 역시 스티로폼으로
만들었다. 공기와 전기적 성질이 가장 유사한 스티아
로폼이 거푸집 내부에 공극을 제작 하는 데에 이용된
것이다. 스티아로폼 블록은 콘크리트 타설시 표면에서
3 cm 아래쪽에 설치하였다. 공기 중에 그냥 철근
을 설치한 시험체도 시험되었다. 모든 실험적 연구의
경우들이 Table. 1에 나타나 있다. 실험장치는 Fig. 7
에 보이는 바와 같이 네트워크분석기, 스위치박스, 동축
케이블, 그리고 안테나배열로 구성되어 있다. 네트워
크분석기는 한쪽 단자로 신호를 송신하고 다른 쪽 단자
로 신호를 수신하면서 수신된 신호의 강도
(magnitude)와 위상(phase)을 계산하는 기능을 가지
고 있다. 네트워크분석기를 이용하면 송신된 신호의 양
(S12)을 측정할 수 있다. 스위치박스는 라디오주파수
(RF: radio frequency) 신호를 이용하여 배열에 들어
있는 안테나들을 제어하는 역할을 한다.

Table. 1. Descriptions of Cases for Experimental Verification

| 번호 | 번호시험체의 상태 | 영상화 구간(x * y) | 결합의 위치(X,Y)(cm) |
|----|----------------------------------|-----------------|-------------------|
| 1 | 콘크리트판 중간에 구형 철재 | 4cm * 20cm | (0,0) |
| 2 | 공기중 직사각형 철재 | 6cm * 20cm | (3,0) |
| 3 | 공기중 직사각형 철재 | 6cm * 20cm | (0,-2) |
| 4 | 콘크리트 시험체 내부에 직사각형 공극(2cm*2cm) | 8cm * 20cm | (4,0) |
| 5 | 콘크리트 시험체 내부에 직사각형 공극(2cm*5cm) | 8cm * 20cm | (4,0) |

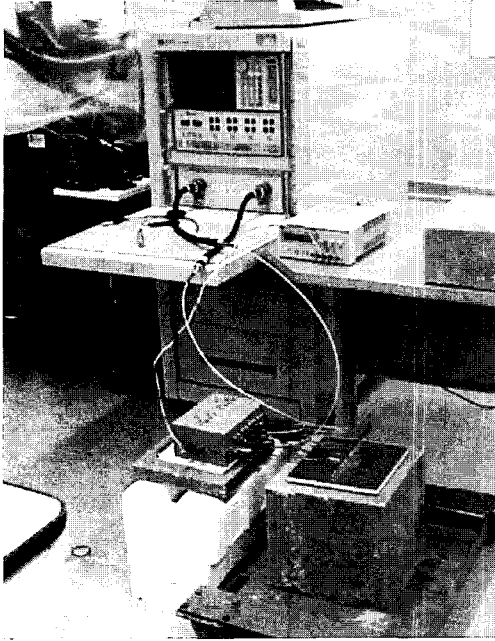


Fig. 7. Experimental setup

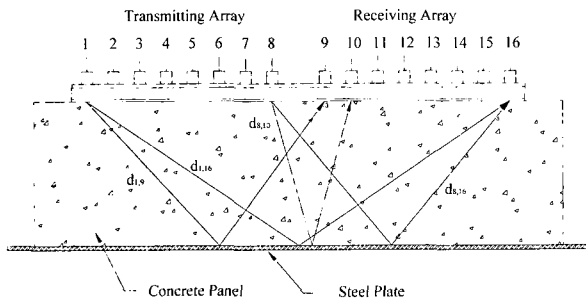


Fig. 8. Calibration Scheme

4.2 캘리브레이션 과정

파동의 반사에 의한 영향과 동축케이블 및 스위치박스에서의 손실이 측정값에 미치는 영향을 제거하기 위하여 각 송신배열에 대한 캘리브레이션이 실시되었다. 캘리브레이션 과정을 위하여 Fig. 8과 같이 결함이나 내부의 철근이 들어있지 않은 콘크리트판이 제작되어 사용되었다.

동축케이블과 스위치박스의 영향을 제외한 모든 송신신호는 그 변수가 송신안테나 배열에서 수신안테나 배열까지의 거리, d_y 에 비례할 때 0차의 2종 행켈함수(zero-order Hankel function of the second kind, $H_0^{(2)}(k_{e,conc}d_{ij})$)에 비례한다(Balanis, 1998). 동축케이블과 스위치박스가 측정값에 미치는 영향(calibration factor)은 캘리브레이션시 얻어진 송신신호를 ($S_{ij}^{(cal_mea)}$) 0차의 2종 행켈함수로 나누어주면 얻어지며 캘리브레이션된 송신신호 ($S_{ij}^{(cal)}$)는 측정된 송신

신호 ($S_{ij}^{(mea)}$)를 캘리브레이션 상수로 나누면 얻어진다. 즉, 송신배열을 i 수신배열을 j 로 할 때 다음의 식과 같이 나타내어진다.

$$S_{ij}^{(cal)} = \frac{S_{ij}^{(mea)}}{Cal_Factor} \quad (10)$$

$$Cal_Factor = \frac{S_{ij}^{(mea)}}{H_0^{(2)}(k_{e,conc}d_{ij})} \quad (11)$$

결함이 없는 콘크리트에서 캘리브레이션된 신호의 강도는 송신배열과 수신배열의 거리에 비례하고 측정행렬(measurement matrix)은 대각요소에 대하여 대칭적이다. 송신신호의 주파수 5.2 GHz에서 얻어진 캘리브레이션 상수가 측정행렬을 캘리브레이션하는 데에도 사용되었다.

번호시험체의 상태영상화 구간 (x y)결함의 위치 (x,y) (cm) 1콘크리트판 중간에 구형 철재 4 cm 20 cm(0,0) 2공기중 직사각형 철재 6 cm 20 cm(3,0) 3공기중 직사각형 철재 6 cm 20 cm(3,-2) 4콘크리트 시험체 내부에 직사각형 공극 (2cm2cm) 8 cm 20 cm(4,0) 5콘크리트 시험체 내부에 직사각형 공극(2cm5cm) 8 cm 20 cm(4,0)

4.3 실험 결과

네트워크분석기에서는 주파수 4.0 GHz 에서 7.0 GHz 사이의 사인함수형(sinusoidal) 전자파들을 발생시켜 송신안테나로 보내고 이 신호는 시험체로 전달되어진다. 스위치박스는 S1,9 에서 S8,16 까지의 신호를 제어하고 주파수 5.2 GHz 에서 각 송신 및 수신배열에서의 신호가 측정행렬로 조합된다. 측정된 신호는 주파수 5.2 GHz에서의 캘리브레이션 상수로 나누어지고 캘리브레이션된 측정행렬의 요소가 구성되어 수치적 초점조정시스템과 곁해진다. 재현된 영상과 시험체의 형태들이 Fig. 9에 나타나 있다. 1번의 경우에는 콘크리트판의 중간에 있는 구형의 철재(steel sphere)의 위치와 크기가 탐지되었는데 시편의 크기가 작으므로 인해 에지효과(edge effect)가 발생하여 시험체의 가장자리 부분에 노이즈(noise)가 발생하였다. 2번과 3번의 경우에는 콘크리트 시험체 대신 공기중에서 파동의 전파를 관측하였다. 이물질인 철재블록의 위치가 탐지되었고 형태나 크기는 정확히 재현되지 못하였으며 그 이유는 공기 중에서 전자파의 감쇄가 심해서 파동의 진행에 제약을 받았기 때문으로 보여진다.

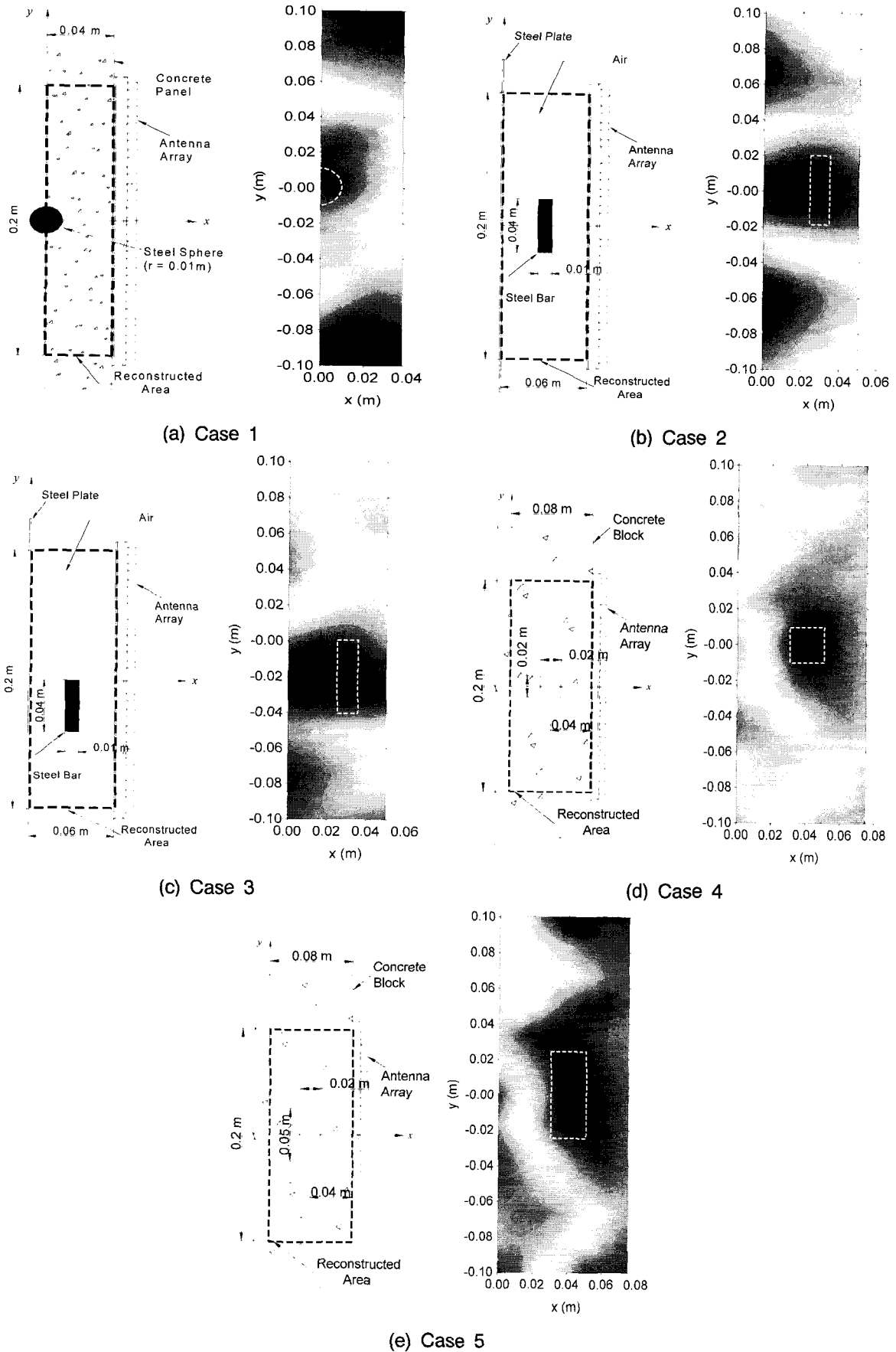


Fig. 9. Experimental results

4번과 5번은 콘크리트 시험체 안에 공극이 있는 경우이다. 재현된 영상은 공극의 위치와 크기, 형태를 정확히 추정하였고 수치적 시뮬레이션 결과와 대단히 일치하는 것이 관측되었다. 초단파를 이용하는 비파괴시험방법은 각각 8 x 8개의 송신 및 수신안테나를 갖는 슬롯안테나를 제작하여 시험체내부의 상태를 검사하는 형태로 진행되었다. 시험을 통하여 슬롯안테나는 파동의 방사기능과 주파수대역의 넓이 등에서 구조부재의 결함탐지에 이용될 수 있다는 것이 보여졌다. 안테나 배치가 선형인 경우 초점조절시스템이 효율적으로 작용하여 비파괴검사가 실질적으로 가능한 유효초점구간은 사다리꼴인 것이 확인되었다. 수치적 시뮬레이션을 통하여 유효초점구역 내에 있는 철재나 공극은 위치와 크기가 정확히 탐지된다는 것이 확인되었다. 콘크리트 판과 콘크리트블록을 이용한 실험결과로부터 시험체 속의 철재나 공극은 위치와 크기가 비교적 정확히 탐지되며 수치적 시뮬레이션 결과와 일치되는 것이 확인되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 2차원 초단파 영상화 기법을 확장하여, 구조물 내부 결함과 철근의 위치를 탐지하기 쉽도록 한 3차원 초단파 영상화 방법을 개발하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

수치시뮬레이션 결과로부터 초점조절 연산자를 이용하여, 콘크리트 재료에서의 파장 오차범위 이내인 해상도를 얻을 수 있었다.

데이터 오류를 줄이는 다중주파수방식에 의하여 재현된 영상의 정확성이 향상되는 것을 검증하였다.

개폐작용과 띠틈-흡 변환작용을 전송방법으로 이용하는 변환된 주파수 조절방법에 의하여 4x4 안테나배열을 설계함으로써 5.2 GHz에서 주파수대역을 넓게 유지하고 우수한 투과성능을 보일 수 있었다.

실험을 통하여 슬롯안테나는 파동의 방사기능과 주파수대역의 넓이 등에서 구조부재의 결함탐지에 이용될 수 있음을 검증하였다.

안테나배치가 선형인 경우 초점조절시스템이 효율적으로 작용하는 유효초점구간은 사다리꼴인 것이 확인되었다.

감사의 글

본 연구는 2003년 금오공과대학교 교내 연구비 지원 사업으로 이루어진 것으로 본 연구를 가능케 한 학교 당국에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Aikawa, M., and Ogawa, H. (1989) "Double-Sided MIC's and Their Applications", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, 37 (2), pp. 406-413.
- Feng, M. Q., Flaviis, F., and Kim, Y. J. (2002) "Use of Microwaves for Damage Detection of Fiber Reinforced Polymer-Wrapped Concrete Structures", Journal of Engineering Mechanics, ASCE, 128 (2), pp. 172-183.
- Gironés, I. M., Jofre, L., Ferrando, M., Reyes, M., and Bolomey, J. Ch. (1987) Microwave Imaging with Crossed Linear Arrays", IEE Proceedings, vol. 134, no. 3, pp. 249-252, June.
- Kim, Y. J., Jofre, L., Flaviis, F., and Feng, M. Q. (2002) "Microwave Sub-Surface Imaging of Damage in Concrete Structures", Proceedings of the 9th International Symposium on Smart Structures and Materials, SPIE, San Diego, CA.
- Kim, Y. J., Jofre, L., Flaviis, F., and Feng, M. Q. (2002) "Microwave Reflection Tomography Array for Damage Detection of Concrete Structures", IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, pp. 651-654, Seattle, WA.
- Kim, Y. J., Jofre, L., Flaviis, F., and Feng, M. Q. (2003) "Microwave Tomographic Array for Damage Detection of Civil Structures", accepted to publish in IEEE Transactions on Antennas and Propagation Knorr, J. B. (1974) "Slot-Line Transitions", IEEE Trans. on Microwave Theory and Techniques, MTT-22, pp. 548-554.
- Pierri, R., Brancaccio, A., and Blasio, F. (2000) "Multifrequency Dielectric Profile Inversion for a Cylindrically Stratified Medium", IEEE Trans. Geoscience and Remote sensing, vol. 38, no. 4, pp. 1716-1724.

© 논문접수일 : 2005년 04월 06일

© 심사의뢰일 : 2005년 04월 12일

© 심사완료일 : 2005년 04월 25일